

**Таблица 1.** Свойства исследуемых покрытий

Соотношение газов	Ar100	Ar75/N25	Ar50/N50	Ar25/N75	N100
Толщина покрытия, нм	499±10	370±16	632±11	480±42	598±55
Шероховатость, нм	16,368	11,121	32,867	19,82	28,471
Краевой угол смачивания, град	68,7±6,6	82,8±11,5	105,4±1,7	86,0±5,9	109,2±2,9

чения содержания азота в смеси рабочих газов. Наличие CN объясняется наличием остатков органических растворителей.

Наибольшей толщиной и шероховатостью характеризуется покрытие группы Ar50/N50. Наиболее гидрофобными являются покрытия групп N100 и Ar50/N50, а наиболее гидрофильными – покрытия группы Ar100.

Исследование жизнеспособности мультипотентных мезенхимальных стромальных клеток показало, что азот-содержащие покрытия групп Ar75/N25 и Ar50/N50 характеризуются досто-

верно лучшими показателями жизнеспособности. Дальнейшее снижение этого показателя по мере увеличения содержания азота в смеси рабочих газов объясняется возникновением цитотоксических свойств покрытий с дальнейшим ростом содержания NO.

Работа выполнена на средства субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

## ВЛИЯНИЕ ТИПА УНТ НА УПЛОТНЕНИЕ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ $ZrO_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ СВОБОДНЫМ СПЕКАНИЕМ

Хаоце Лю, Цзин Ли, А.А. Леонов

Научный руководитель – инженер, м.н.с. А.А. Леонов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, laa91@tpu.ru*

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, Россия, г. Томск, пр-т Академический 2/3*

Углеродные нанотрубки (УНТ) широко используются для армирования различных материалов, с целью улучшения физико-механических, прочностных и трибологических свойств, а также для создания композитов с новыми функциональными свойствами. Существуют одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), которые представляют собой полую цилиндрическую структуру, сформированную из слоя графена и многостенные (МУНТ), которые состоят из вложенных друг в друга концентрических слоев свернутого графена. ОУНТ и МУНТ имеют высокие механические свойства и, находясь в матрице композиционного материала, могут принимать на себя долю механической нагрузки, тем самым повышая физико-механические свойства композита. Однако такие волокнистые углеродные наноматериалы в композиционных порошках могут существенно влиять на процессы прессования и спекания, а также на фазовый состав спеченных композитов, что непременно

сказывается на физико-механических свойствах. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния добавок ОУНТ и МУНТ на уплотнение, фазовый состав и физико-механические свойства композитов на основе  $ZrO_2$ , полученных свободным спеканием.

Нанопорошок  $ZrO_2 + 3$  мол.  $Y_2O_3$  (Tosoh, Япония) использовали в качестве матричного материала для создания композитов. ОУНТ марки «Tuball» с  $S_{уд} = 546 \text{ м}^2/\text{г}$  (OCSiAl, г. Новосибирск, Россия) и МУНТ марки «Таунит» с  $S_{уд} = 103 \text{ м}^2/\text{г}$  (НаноТехЦентр, г. Тамбов, Россия) использовали в качестве армирующих добавок. Смешивание УНТ с нанопорошком  $ZrO_2$  осуществляли в среде этанола с использованием ультразвуковой ванны и магнитной мешалки [1, 2]. Получали композиционные порошки с 0,1, 0,5 и 1 мас. % ОУНТ и с 1, 5, 10 мас. % МУНТ. Из полученных порошков изготавливали компакты одноосным односторонним прессованием при 100 МПа, используя пресс ИП-500М-авто (ЗИПО, Россия).

Спрессованные компакты спекали в высокотемпературной вакуумной печи VHT 8/22-GR (Nabertherm, Германия) в течение 2 ч при температуре 1500 °С.

Показано, что при увеличении добавок ОУНТ (до 1 мас. %) происходит плавное снижение относительной плотности спеченных композитов с 99,20% до 97,52%. Плотность композита  $ZrO_2$ /1 мас. % МУНТ (98,66%) немного ниже плотности керамики  $ZrO_2$  (99,20%). Однако более высокие концентрации добавок МУНТ (5 и 10 мас. %) затрудняют уплотнение/спекание композитов, что приводит к снижению относительной плотности до 81,22%, т.к. высокие концентрации волокнистых МУНТ подавляют проскальзывание и перегруппировку наночастиц  $ZrO_2$  в процессе уплотнения.

В спеченной керамике  $ZrO_2$  и композитах с ОУНТ идентифицируется только тетрагональная фаза диоксида циркония  $t-ZrO_2$ , посторонних фаз не обнаруживается (рис. 1а и 1б). Однако в композитах  $ZrO_2$ /ОУНТ полученных электроимпульсным плазменным спеканием наблюдалось присутствие моноклинной фазы  $ZrO_2$  [3]. В композитах с МУНТ (5 и 10 мас. %) кроме  $t-ZrO_2$  фазы появляется кубическая фаза карбида циркония  $c-ZrC$  (рис. 1в), что согласуется с [4]. Микротвердость композитов  $ZrO_2$ /ОУНТ незначительно увеличивается с 12,77 ГПа (для керамики  $ZrO_2$ ) до 13,64 ГПа (для композита  $ZrO_2$ /0,5

ОУНТ), что вероятно связано с уменьшенным размером зерна композита. Трещиностойкость композитов  $ZrO_2$ /ОУНТ пропорционально увеличивается с 4,13 МПа•м<sup>1/2</sup> до 4,60 МПа•м<sup>1/2</sup> с увеличением содержания ОУНТ. Композиты  $ZrO_2$ /МУНТ имеют пониженную микротвердость и трещиностойкость, т.к. они имеют сниженную плотность и более высокое содержание «мягкой» фазы МУНТ.

Таким образом, показано, что ОУНТ являются предпочтительным материалом для армирования керамики  $ZrO_2$ , т.к. в таких композитах более высокая плотность, не формируется примесных фаз и повышенные микротвердость и трещиностойкость.

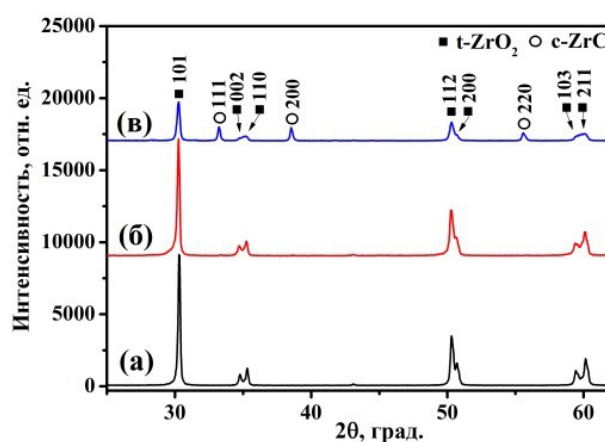


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы спеченной керамики  $ZrO_2$  (а), композита  $ZrO_2$ /1 мас. % ОУНТ (б) и композита  $ZrO_2$ /10 мас. % МУНТ (в)

### Список литературы

1. Leonov A.A. and Abdulmenova E.V. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2019.— V.511.— P.012001.
2. Leonov A. // Mater. Today Proc., 2019.— V.11.— P.66–71.
3. Леонов А.А. и др. // Рос. нанотех., 2019.— Т.14.— №3–4.— С.32–38.
4. Leonov A.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser., 2019.— V.1393.— P.012106.

## ЗОЛЬ ГЕЛЬ СИНТЕЗ ПОРОШКА ДЛЯ ТОНКОЙ КЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩЕГО ОТХОДА

Ф.Г. Хомидов, Х.Л. Усманов, Ш.М. Ниязова  
 Научный руководитель – д.х.н., профессор З.Р. Кадырова  
 Институт общей и неорганической химии АН РУз  
 100170, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Мирзо Улугбек 77-а

В настоящее время вызывает большой интерес исследования в области синтеза и изучения функциональных нанокompозитных материалов, в частности высокотемпературной нанокерамики, которые имеют особые физико-химическую и оптическую свойства как коррозионная стой-

кость, термостойкость, износостойкость, термическая и химическая стойкость, а также высокая прочность [1–2].

В этой связи значительный интерес представляют материалы на основе алюмомагниево-шпинели, которая является весьма перспектив-